AA7075-T6 复杂加载状态下断裂极限研究

江娜[1],尚宏春[1],王计真[2],李旭阳[2],张冲[1],王松臣[1],娄燕山[1]

(1. 西安交通大学机械工程学院,710049 西安;2. 中国飞机强度研究所,710065 西安)

摘　要:为研究航空铝合金 AA7075-T6 板材在复杂加载状态下的韧性断裂力学性能,设计 4 种包含不同应力状态的拉伸试验和液压胀形试验来获取材料的硬化特性和断裂参数。通过不同应变率和不同轧制方向的拉伸试验得到相应的应力-应变曲线,分别采用不同硬化模型和 DF2016 韧性断裂准则对其硬化行为和断裂特性进行表征。结果表明 AA7075-T6 狗棒试件在应变率为 1 s^{-1}和 10 s^{-1}时重复性较好,应变率为 100 s^{-1}时应力-应变曲线出现明显的抖动,但随着应变率的增加没有出现明显的应变率强化效应。而且对比 7 个轧制方向的应力-应变结果发现,不同角度的拉伸强度和断裂应变基本相同。因此在研究范围内 AA7075-T6 表现为一种各向同性且关于应变率不敏感的材料。采用 Swift-Voce 硬化模型的预测效果最好,DF2016 韧性断裂准则可以准确预测 AA7075-T6 在剪切、单轴拉伸、平面应变拉伸和等轴拉伸等不同应力状态的断裂位置。

关键词:断裂参数;7075 铝合金;应变率;力学性能;试验

中图分类号:TH142.2　　**文献标志码**:A

Study on fracture limit of AA7075-T6 under complex loading state

JIANG Na[1], SHANG Hongchun[1], WANG Jizhen[2], LI Xuyang[2], ZHANG Chong[1], WANG Songchen[1], LOU Yanshan[1]

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, 710049 Xi'an, China;
2. China Aircraft Strength Institute, 710065 Xi'an, China)

Abstract: In order to study the ductile fracture mechanical properties of aviation aluminum alloy AA7075-T6 sheet under complex loading states, four tensile tests and hydraulic bulging tests with different stress states were designed to obtain the hardening properties and fracture parameters of the material. Corresponding stress-strain curves were obtained through tensile tests at different strain rates and rolling directions, and different hardening models and DF2016 ductile fracture criterion were used to characterize their hardening behavior and fracture properties. The results show that the AA7075-T6 dogbone specimen has good repeatability when the strain rate is 1 s^{-1} and 10 s^{-1}, and the stress-strain curve shows obvious jitter when the strain rate is 100 s^{-1}, but it does not increase with the increase of the strain rate. A significant strain rate strengthening effect appears. Moreover, comparison of the stress-strain results in the seven rolling directions reveals that the tensile strength and fracture strain of different angles are basically the same. Therefore AA7075-T6 behaves as an isotropic and insensitive material with respect to strain rate in the

收稿日期:2022-03-31　　**修回日期**:2022-06-06
基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 52075423)
通信作者:娄燕山,教授. E-mail:ys.lou@xjtu.edu.cn
引用格式:江娜,尚宏春,王计真,等. AA7075-T6 复杂加载状态下断裂极限研究[J]. 应用力学学报,2022,39(4):617-626.
JIANG Na, SHANG Hongchun, WANG Jizhen, et al. Study on fracture limit of AA7075-T6 under complex loading state[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2022, 39(4):617-626.

study range. The Swift-Voce hardening model is used to predict the best results, and the DF2016 ductile fracture criterion can accurately predict the fracture position of AA7075-T6 in different stress states such as shear, uniaxial tension, plane strain tension and equiaxed tension.

Key words: fracture parameters; 7075 aluminum alloy; strain rate; mechanical property; experiment

近年来随着碳中和理念的兴起,节能、环保越来越受到重视。据研究表明,减少构件重量,可有效降低碳排放[1]。轻质高强铝合金由于其密度低、比强度高被广泛应用于制作飞机重要受力结构件,是应用前景较佳的轻质高强航空材料[2-3],显著降低了飞机的整体质量,从而减少燃料排放和能源消耗。目前,常用结构件上的铝合金主要使用 AA2xxx 系、AA5xxx 系、AA6xxx 系、AA7xxx 系 [4],其中 AA7xxx 系铝合金具有极好的硬度、强度、导电性和抗腐蚀性等物理特性[5],被应用于飞机关键骨架的制造。但这些高强度铝合金延伸性较差,在板料成形过程中易在未产生明显缩颈现象之前以韧性剪切断裂的形式失效[6]。传统的以颈缩现象为依据建立的拉伸失稳理论不适用于此类材料的成形极限研究。以耦合韧性断裂准则(例如 GTN 模型)和非耦合韧性断裂构成的韧性损伤理论被广泛应用于高强钢和铝合金的断裂研究。在近十五年,损伤断裂预测理论越来越得到重视,研究人员们提出的损伤断裂模型大多将应力三轴、Lode 参数和最大剪应力对成形极限的影响列入考虑范畴,新提出的损伤断裂模型基本能够描述不同材料加载状态下的断裂应变。研究人员将比较典型的断裂准则应用到各种成形过程中,并取得了比较可靠的预测结果[7-12]。关于损伤断裂的最新研究进展,顾彬等[13]综述分析了细观损伤力学模型、连续介质损伤力学模型和非耦合型各向异性断裂模型描述的各向异性行为。贾哲等[14]评述了韧性断裂预测模型的研究进展和应用现状。李非凡等[15]介绍了用于延性断裂准则标定的断裂实验研究进展,整理了典型的或者新颖的实验设备以及断裂试样。詹梅等[16]将不同损伤模型耦合到各向异性 Barlat 89 屈服准则中,通过半隐式图形返回算法进行数值化,来实现应力、应变和损伤值等变量的更新。Hu 等[17]系统总结了 SMF 过程中与颈缩相关的成形性和与韧性断裂相关的成形性研究,突出了每个模型的适用性和局限性,以及成形极限图与指出的韧性断裂准则之间的联系。

目前国内外对铝合金的研究较多。Samek 等[18]研究了应变速率和温度对低合金 TRIP 钢的影响。Wasilkowska 等[19]指出,在应变率为 0.02 s^{-1} 和 0.002 s^{-1} 时,均匀分布的马氏体有利于材料的变形,但对材料的极限强度影响较小。De 等[20]在碰撞分析中研究了应变速率和温度对高强度钢的影响,提出了一种变形模型用于解释低合金的高应变率行为。Lee 等[21]研究了 AA7075-T6 在固溶热处理温度下制成的中柱,结果表明抗侵入性显著提高了 28% 且重量减轻了 36%。Saito 等[22]通过试验研究了不同应变速率和温度对低碳 TRIP 钢塑性变形特性的影响,发现应变速率的增加导致温度的升高,从而抑制了马氏体相变。Hashimoto 等[23]发现,在高强度钢中增加 Nb 和 Mo 的含量可以改善材料的拉伸性能和拉伸强度,材料具有更好的屈服强度、极限强度和延展性。Baik 等[24]通过单向拉伸试验研究了氮对高强度钢力学性能的影响,研究发现,随着氮含量的增加,材料的抗拉强度也随之增加。Lee 等[25]研究了热处理和硅含量对低碳相变塑性冷轧钢板组织和力学性能的影响。倪炀等[26]研究了 7075 合金在高温下的力学性能,发现 7075 铝合金的力学性能受变形温度、应变速率及轧制方向的影响,7075 铝合金的抗拉强度随应变率的增大而增加。王辉等[27]对 7075 铝合金的温成形性能进行了研究,7075 铝合金在温度高于 260 ℃时,成形性能和成形后材料的力学性能均出现下降趋势。周国伟等[28]研究了 T6 态 7075 铝合金温热下各向异性,其中研究发现温度低于 250 ℃时,Barlat89 屈服函数的形状基本一致。任平平等[29]研究了 7050 铝合金板材的各向异性,发现变形方向对 7075 铝合金板材各力学性能的面内各向异性影响不大。武永甫等[30]研究了 7075-T651 动态流变应力特征,在应变率为 600 ~ 12 000 s^{-1} 的动态压缩试验中发现铝合金 7075-T651 的流变应力对应变率不敏感,对温度有较强的敏感性。目前的研究多涉及 7075 铝合金在不同温度和应变率下的力学行为。因此,有必要设计实验研究 AA7075-T6 钢板在复杂加载状态下的力学响应和断裂行为,以期实现对其承载能力和断裂行为的准确预测。

本研究以 AA7075-T6 铝合金为研究对象,对其

在单轴拉伸、平面应变拉伸、剪切和双拉等不同应力状态下进行试验,阐明其在复杂应力状态下的韧性断裂行为。采用 Swift-Voce 硬化准则对其塑性变形行为进行表征。利用 DF2016 韧性断裂准则描述断裂行为。结果表明所选取的本构方程和韧性断裂准则可以准确地对 AA7075-T6 铝合金的塑性变形和韧性断裂行为进行表征,从而提高应用的安全性和效率,为企业和科研机构后续研究提供参考数据。

1 试验研究

1.1 试验材料和试样制备

本研究选取了厚度为 2 mm 的 AA7075-T6 铝合金板材作为试验材料,其化学成分如表 1 所示[31]。

为测得 AA7075-T6 铝合金板材在复杂应力状态下的力学响应和断裂行为,参考 Lou 等[9]的研究设计了 4 种不同形状的试样,分别为狗棒试件(Dog-bone)、中心孔试件(Hole)、$R = 5$ mm 的缺口试件(Sheer)和面内剪切试件(Notch),如图 1 所示。其次设计了圆形液压胀性试样。

表 1 7075-T6 铝合金板材化学成分(单位:wt. %)

Tab. 1 Chemical composition of 7075-T6 aluminum alloy sheet (unit:wt. %)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
0.23	0.31	1.65	0.22	2.36	0.24	5.72	0.10	余量

1.2 试件不同轧制方向的拉伸试验

采用基于 XTOP 数字图像相关(DIC)系统的 INSTRON 5182 万能试验机分别进行了与轧制方向成 0°、15°、30°、45°、60°、75°、90°的 AA7075-T6 狗棒试件单轴拉伸试验,将喷有散斑的狗棒试样夹持在万能材料试验机上进行拉伸,直至试样拉伸发生断裂为止,并在试验过程中利用 DIC 记录试样塑性变形演变进程,DIC 三维全场应变测量分析系统如图 2 所示。每种试样均采用激光切割且每个方向至少加工 4 组以检验试验结果的重复性。

用 DIC 系统得到应变数据,分析计算得到 7 个轧制方向的力-位移数据后,计算并绘出应力-应变曲线,如图 3 所示,其中 RD 表示与轧制方向呈 0°的单轴拉伸试验。根据图 3 中的 2 张曲线图未能明显地看出各向异性,为后续计算分析方便,将其视为各向同性。

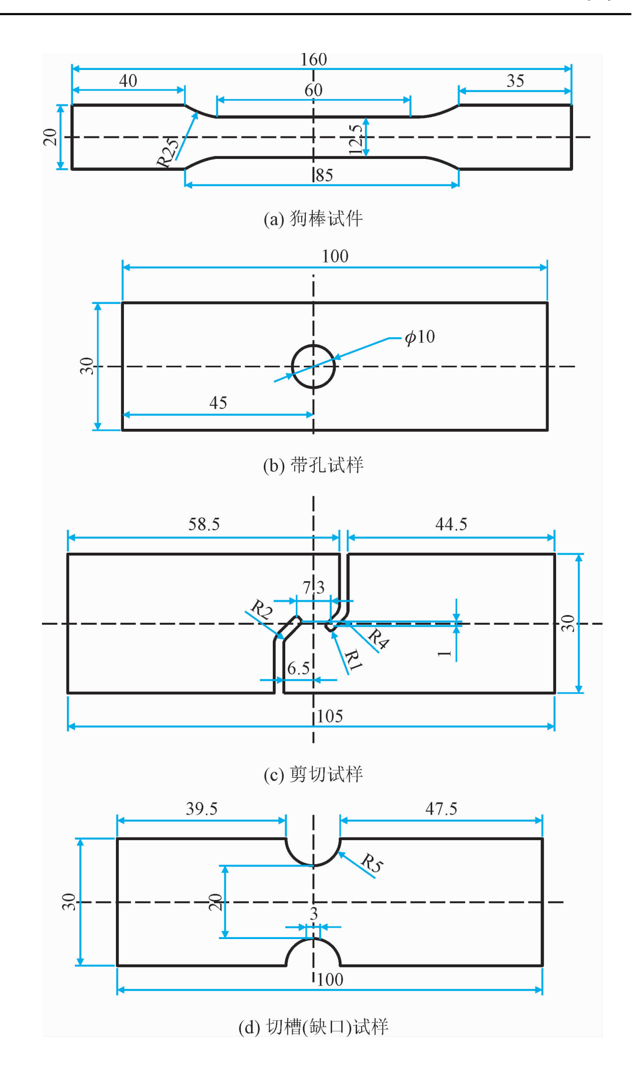


图 1 AA7075-T6 板材 4 种典型加载情况下的不同形状的试样尺寸图

Fig. 1 Sample sizes of AA7075-T6 sheet with different shapes under four typical loading conditions

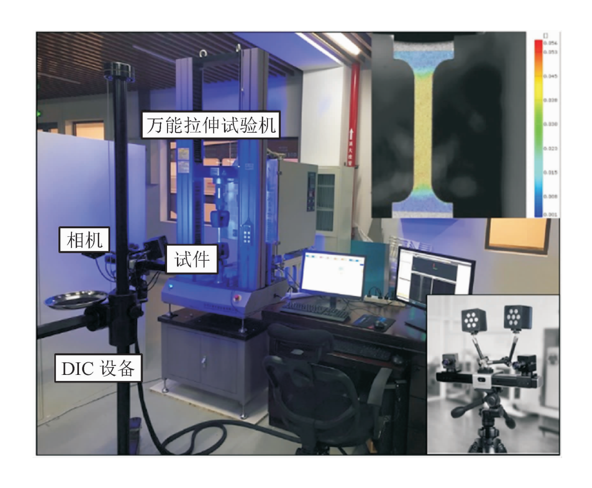


图 2 DIC 三位全场应变测量分析系统

Fig. 2 DIC three-position full-field measurement and analysis system

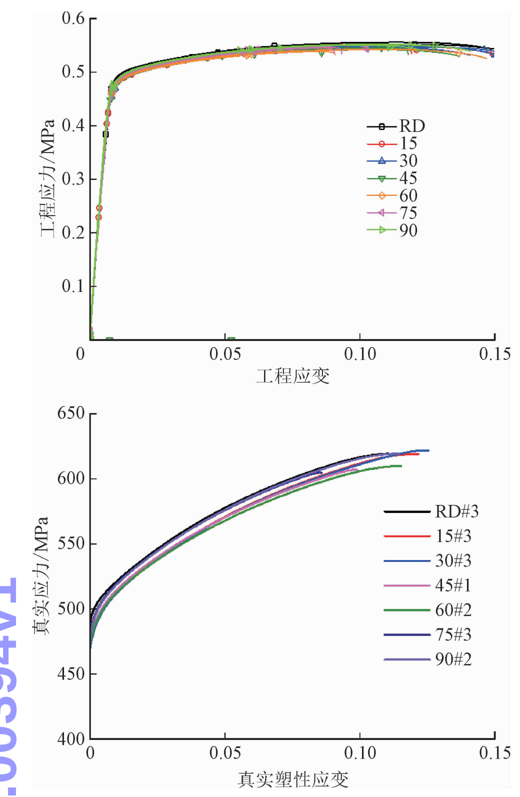


图 3　狗棒试件 7 种方向的工程应力-工程应变曲线和真实应力-真实塑性应变曲线

Fig. 3　Engineering stress-strain curves and real stress-real plastic strain curves of dog bar specimens in 7 directions

1.3　准静态和高速拉伸试验

准静态应变率状态下的 AA7075-T6 的应变率硬化特性是通过准静态拉伸试验和高速拉伸试验获得的。采用基于 XTOP 数字图像相关(DIC)系统的 INSTRON 5182 万能试验机分别进行了应变率为 $0.001\ s^{-1}$、$0.01\ s^{-1}$、$0.1\ s^{-1}$的单轴拉伸试验,并在实验过程中利用 DIC 记录试样塑性变形演变进程。每种试样均采用激光切割且每个应变率至少加工 3 组以检验试验结果的重复性,表 2 为 AA7075-T6 不同试件的拉伸速率。

表 2　AA7075-T6 不同试件不同应变率的拉伸速度(单位:mm/min)

Tab. 2　Tensile velocity of different AA7075-T6 specimens at different strain rates (unit:mm/min)

应变率/s^{-1}	Dogbone	Hole	Notch	Sheer
0.001	3.6	0.5	0.5	0.5
0.01	36	5	5	5
0.1	360	50	50	50

为探讨 AA7075-T6 材料在高应变率下的断裂行为,对于如图 1(a)所示尺寸形状的狗棒试样,利用中国飞机强度研究所的高速冲击试验系统对其从静态应变率 $1\ s^{-1}$、$10\ s^{-1}$、$100\ s^{-1}$进行了单向拉伸试验。

AA7075-T6 在准静态应变率为 $0.001\ s^{-1}$、$0.01\ s^{-1}$、$0.1\ s^{-1}$单向拉伸的载荷-行程曲线如图 4 所示。将完全失去承载能力时的行程定义为断裂行程,断裂后的数据对本次研究的意义不大,因此将本研究的所有图像统一做了相关处理,视为断裂开始后就完成断裂。图 4 为狗棒试件的力-位移曲线,狗棒试样在应变率为 $0.001\ s^{-1}$、$0.01\ s^{-1}$、$0.1\ s^{-1}$下的力-位移曲线重复性较好,未有明显差异,因其余 3 种形状试样重复性较好,此处省略。其中由狗棒试件的力-位移曲线计算得出工程应力-工程应变曲线图和真实应力-真实塑性应变曲线图,如图 5 所示。

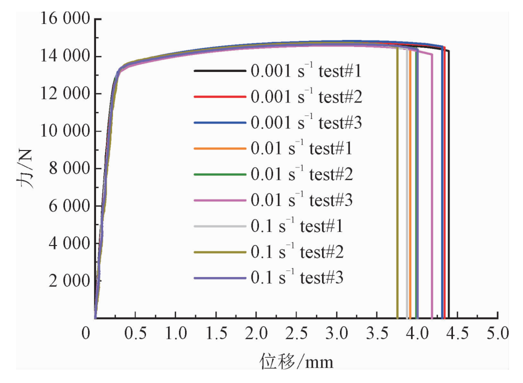


图 4　狗棒试件的力-位移曲线

Fig. 4　Force-storke curves of dogbone specimens

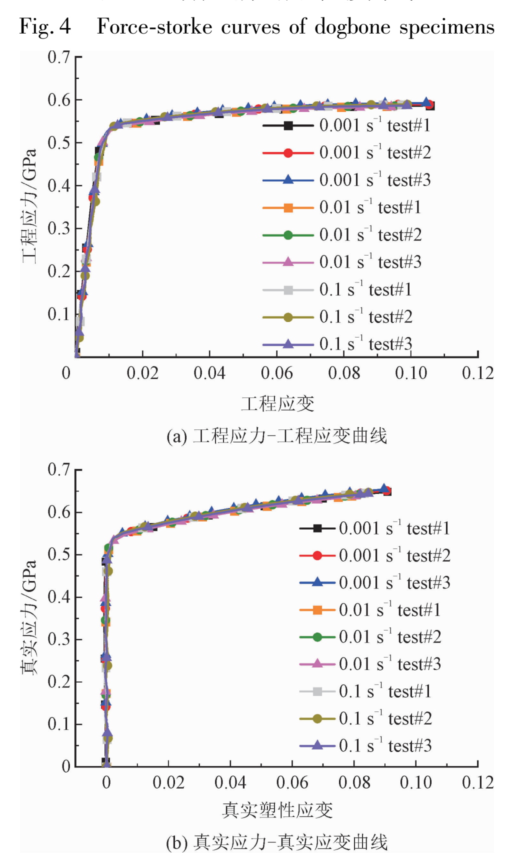


图 5　狗棒试件的工程应力-工程应变曲线和真实应力-真实塑性应变曲线

Fig. 5　Engineering stress-engineering strain curve and real stress-real plastic curve of dogbone specimen

在 3 种高应变率拉伸载荷状态下，AA7075-T6 的狗棒试样的试验断裂实物图图 6 所示。

图 7 为利用 DIC 处理的 AA7075-T6 狗棒试件在不同应变率上的力-位移曲线结果，发现应变率为 1 s^{-1} 和 10 s^{-1} 时重复性较好，应变率为 100 s^{-1} 时，拉伸速度过快，设备出现抖动，造成相机采集不稳定，导致力-位移波动较大，但是重复性不是很差，随着材料的应变率增加，材料的屈服强度未有明显提高，综上所述，AA7075-T6 在所研究的应变率范围 0.001 s^{-1} ~ 100 s^{-1} 内不是应变率敏感材料。

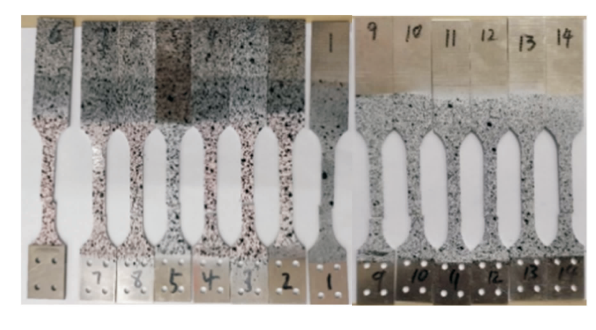


图 6　狗棒试件断裂实物图

Fig. 6　Physical picture of dogbone specimen fracture

(a) 狗棒应变率 1 s^{-1} 力-位移曲线

(b) 狗棒应变率 10 s^{-1} 力-位移曲线

(c) 狗棒应变率 100 s^{-1} 力-位移曲线

(d) 狗棒三个高应变率力-位移曲线

图 7　AA7075-T6 狗棒试件断裂后力-位移曲线图

Fig. 7　Load-stroke curve of AA7075-T6 dogbone specimen after fracture

1.4　液压胀形试验

利用 DIC 系统对 AA7075-T6 进行半球刚模液压胀形试验，将直径 180 mm 的圆形试样置于下模型腔上，当流体在均匀增加的压力下进入液压腔时，在轴向推力和高压液体的共同作用下，材料达到屈服应力后，试样发生变形，在凹模隆起实现补料，压边力设置为 300 kN，以避免试样在试验过程中发生径向滑移，当试样应变超过其成形极限时，试样的极点区域发生断裂。通过 DIC 系统得到材料双轴拉伸时的断裂应变。

在试验过程中 DIC 系统采集的照片如图 8 所示，试验完成后试件实物图如图 9 所示。

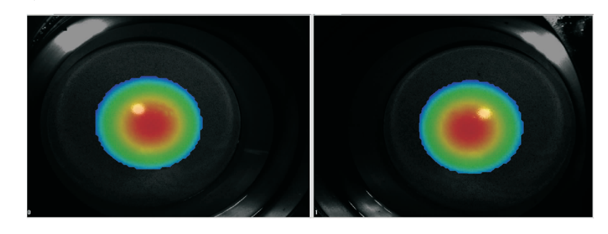


图 8　试验过程中 DIC 采集照片

Fig. 8　DIC photographs were collected during the experiment



图 9　试验完成后的实物图

Fig. 9　The real picture after the test

从 DIC 中提取 AA7075-T6 准静态下不同试件的应变路径如图 10 所示。试件设计成不同形状，则在变形中会趋于不同应变状态。在板料成形的过程中，每个部位结构不同，受力不同，所以研究材料复杂加载状态下的断裂极限对工程上板料成形技术的发展有推动作用。

图 10　AA7075-T6 不同应力状态下的应变路径图

Fig. 10　Strain path diagram of AA7075-T6 under different stress states

2　结果与讨论

2.1　狗棒硬化曲线标定

常用的各向同性的硬化模型有 Swift 硬化模型、Voce 硬化模型、Swift-Voce 硬化模型和 Hocket-Sherby 硬化模型等，这 4 种硬化模型的拟合公式如(1)、(2)、(3)和(4)所示。

$$\sigma = k(\varepsilon_0 + \varepsilon_p)n \quad (1)$$

式中：k 为硬化系数；n 为材料相关常数；ε_0 为预应力。

$$\sigma = A - B\exp(-c\varepsilon_p) \quad (2)$$

式中：A、B 为与材料应力相关的参数。

$$\sigma = \alpha k(\varepsilon_0 + \varepsilon_p)n + (1-\alpha)[A - B\exp(-c\varepsilon_p)] \quad (3)$$

式中 α 为比例系数。

$$\sigma = A - B\exp(-C\,\varepsilon n_p) \quad (4)$$

式中 C 为材料相关常数。

为选择合适的硬化模型来描述 AA7075-T6 板材不同轧制方向的应力变化情况，采用 Swift 硬化模型、Voce 硬化模型、Swift-Voce 硬化模型和 Hockett-Sherby 硬化模型拟合与轧制角度成 00°的第三号试件的真实应力-真实塑性应变曲线，上述几种硬化模型拟合得到的材料参数如表 3 所示，拟合得到的不同硬化模型在大变形情况下预测的真实应力-真实塑性应变的关系如图 10 所示。分析图中曲线情况，材料处于小变形阶段时，3 种硬化模型拟合的真实应力-真实塑性应变曲线的效果都比较好，精度较高，但由于断裂是材料在发生大应变变形时产生的极端现象，观察图 10 发现，当应变大于 0.12 后 3 种硬化模型预测应力有明显的差别，其中 Swift 硬化模型预测应力较高而 Voce 硬化模型预测应力偏低。因此选择 Swift-Voce 硬化模型。

表 3　AA7075-T6 狗棒试件 3 种硬化模型拟合材料参数

Tab. 3　AA7075-T6 dogbone specimen hardening model fitting material parameters

Swift 硬化模型			Voce 硬化模型			Hockett-Sherby 硬化模型			
k/MPa	ε_0	n	A/MPa	B/MPa	C	A/MPa	B/MPa	C	n
798.9	0.0197	0.122	646.9	497.7	15.48	696.9	492.5	5.9	0.801

2.2　液压胀形试验数据处理

胀形实验中，极点位置最接近双拉状态[32]，如图 11 所示，用 DIC 系统对破裂区域进行应变测量，提取断口区域极限主应变，应力计算公式为

$$\sigma = \frac{P\rho}{2t} \quad (5)$$

式中：$P = \frac{F}{\pi r^2}$；ρ 为 DIC 系统中提取；t 为基于体积不

变原则,从 DIC 系统提取的数据进行计算得到的。

将 AA7075-T6 的双拉状态硬化数据与 7 个方向的单拉状态数据比较,如图 13 所示,双拉状态能测得更大应变。

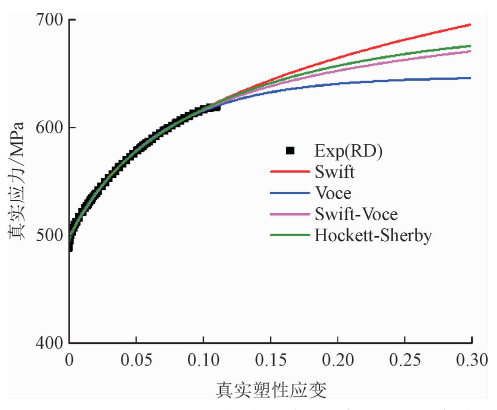


图 11 AA7075-T6 狗棒试件拟合得到的真实应力-真实塑性应变曲线图

Fig. 11 True stress-ture plastic strain curve obtained by fitting AA7075-T6 dogbone specimen

从 DIC 系统提取的数据及数据处理得出压强、极点曲率半径、极点厚度和极点 Mises 应变随成形高度变化关系曲线,如图 14 所示。试样变形程度增加,成形高度增加,极点应变和压强随之增加,极点曲率半径和极点厚度随之减少。图 14(b)中,为了测量准确,选择以极点为中心,半径 r 分别为 5 mm,10 mm 和 15 mm 的范围内进行极点曲率半径变化的分析,其中范围较大,分析越精确,$r=15$ mm 的数据波动最小。

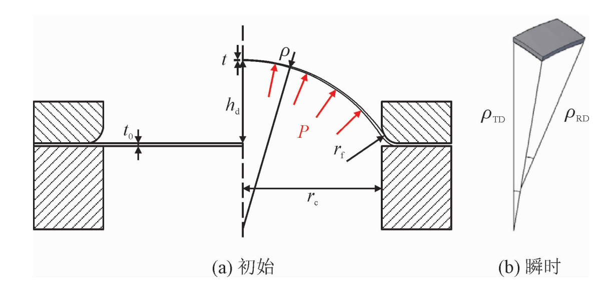


图 12 胀形试验方案

Fig. 12 Bulging test scheme

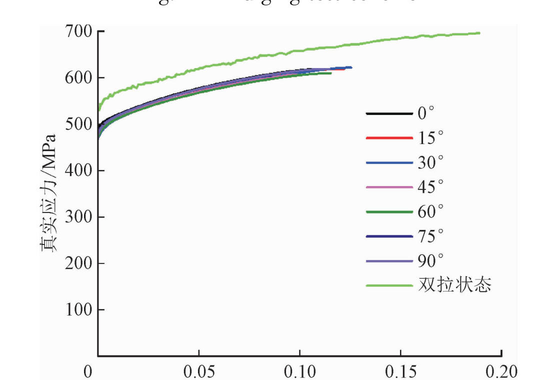


图 13 双拉状态和单拉状态下真实应力-真实应变曲线比较

Fig. 13 Comparison of true stress-strain curves under double tension and single tension

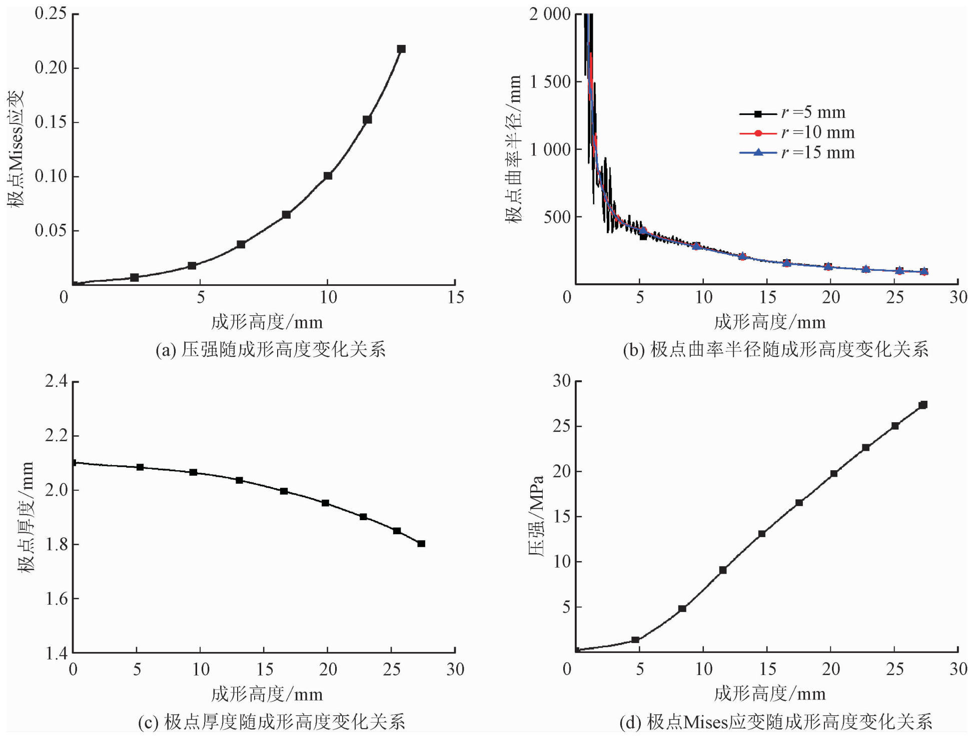


图 14 各种因素随成形高度变化关系曲线图

Fig. 14 Relationship curve of various factors with forming height

3　断裂准则标定及结果分析

通过对比不同方向应力应变曲线，可以看出在不同应变率和不同试件形状下，AA7075-T6 显示出各向同性，所以采用 Von Mises 屈服函数。利用 Lou 等[7]对 DF2014 断裂准则中和 Lode 参数相关的应力三轴度的截止值进行修正，提出的 DF2016 韧性断裂准则对 AA7075-T6 的断裂特性进行预测，DF2016 韧性断裂准则的表达形式为

$$\begin{cases}\int_0^{\bar{\varepsilon}_f}\left(\frac{2\tau_{max}}{\bar{\sigma}}\right)^{C_1}\left(\frac{f(\eta,L,C)}{f\left(\frac{1}{3},-1,C\right)}\right)^{C_2}\mathrm{d}\bar{\varepsilon}_p = C_3\\ f(\eta,L,C)=\eta+C_4\frac{3-L}{3\sqrt{L2+3}}+C,\langle x\rangle=\begin{cases}x,x\geqslant 0\\ 0,x<0\end{cases}\end{cases} \tag{6}$$

DF2016 准则经空间状态转换为$(\eta,L,\bar{\varepsilon}_f)$的表达式为

$$\left(\frac{2}{\sqrt{L2+3}}\right)^{C_1}\left(\frac{f(\eta,L,C)}{f\left(\frac{1}{3},-1,C\right)}\right)^{C_2}\bar{\varepsilon}p_f=C_3 \tag{7}$$

式中 C_1,C_2,C_3,C_4,C 为材料参数，需要试验数据进行标定。

DF2016 是 Lou 等[9]从孔洞的成核、生长和剪切聚合等韧性断裂微观机制出发，通过修改 DF2014 准则提出的一种剪切韧性断裂准则。这个准则可以准确地描述剪切、单轴拉伸、平面应变拉伸和平衡双轴拉伸等应力状态下板料成形的断裂行为。DF2016 准则具有很多优点，相比较 DF2012 与 DF2014 准则，其具有更高的灵活性，在 $\eta=1/3$ 处标定更加准确。

对于 DF2016 韧性断裂模型，有 4 个系数与韧性断裂行为有关，这些系数由纯剪切（$n=0,L=0$）、单轴拉伸（$n=1/3,L=-1$），平面应变拉伸（$n=1/\sqrt{3}$，$L=0$）和等轴双向拉伸（$n=2/3,L=1$）标定，用 DF2016 非耦合韧性断裂准则的参数标定结果如表 4 所示，该韧性断裂准则在空间下的断裂包络面如图 15 所示，可以看出这几种试验断裂应变都可以用 DF2016 准则正确地模拟。$(\eta,\bar{\varepsilon}_f)$空间中的断裂轨迹如图 16 所示，实验中等效塑性断裂应变以黑点表示，黑点基本都落在曲线附近，可见与预测轨迹吻合较好，良好的一致性表明 Lou 等提出的 DF2016 韧性断裂准则对这些试样从剪切到单轴拉伸的韧性断裂提供了充分的可预测性。需要注意的是，图 16 显示的是应力三轴度 η 和等效塑性应变空间的断裂轨迹，没有显示对应的 Lode 参数的断裂轨迹。

二维应力状态(η,L)表征图如图 17 所示，上述 4 种应力状态涵盖了板料成形中韧性断裂地所有临界加载条件。可见 DF2016 准则较好地描述了 AA7075-T6 在剪切、单轴拉伸、平面应变拉伸和等轴拉伸条件下的断裂行为。

表 4　DF2016 准则参数标定结果

Tab. 4　Calibration results of DF2016 criterion parameters

C_1	C_2	C_3	C_4
-1.1951	2.3901	4.0727	0.2180

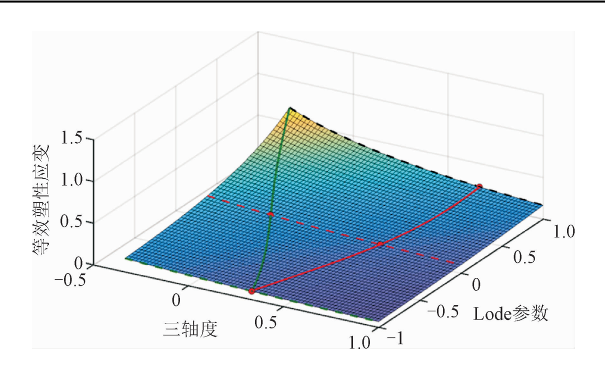


图 15　DF2016 AA7075-T6 空间断裂轨迹

Fig. 15　DF2016 AA7075-T6 space fracture trajectory

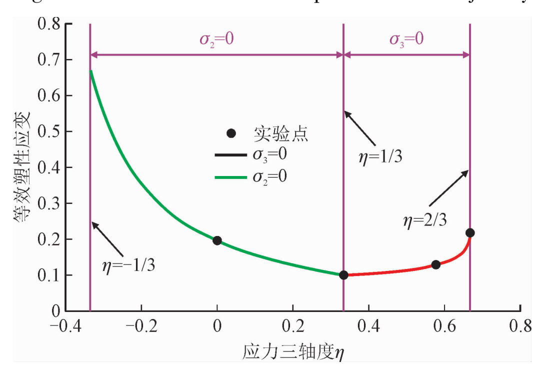


图 16　平面应力条件下断裂准则的断裂轨迹

Fig. 16　Fracture trajectory of fracture criterion under plane stress

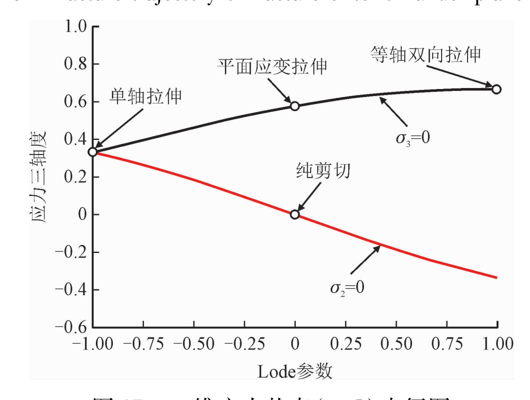


图 17　二维应力状态(η,L)表征图

Fig. 17　Two-dimensional stress state (η,L) characterization diagram

4 结 论

韧性断裂被认为是大多数金属成形过程中的主要失效形式,如锻造、挤压、拉丝和钣金成形。因此,金属切削或成形过程的数值设计、优化和分析需要精确的断裂准则和屈服函数来描述其塑性和断裂行为,以提高有限元模型的可靠性。

1)本研究通过设计 5 种 AA7075-T6 试样进行试验,在准静态、动态、不同轧制方向和液压胀形试验测试了 AA7075-T6 材料在不同的复杂应力状态下韧性力学断裂性能。

2)分析了 AA7075-T6 在不同应变率状态下的动态硬化行为,研究发现没有明显的应变率强化效应。

3)用 Swift-Voce 硬化准则准确标定了硬化曲线,将 DF2016 准则对不同应力状态下断裂轨迹进行准确表征。结果与试验吻合较好,因此,建议采用 DF2016 断裂准则对 AA7075-T6 在不同加载条件下的韧性断裂进行预测。

参考文献:

[1] 罗智. 镁合金材 NVH 特性及其汽车应用研究[D]. 杭州:浙江大学,2014.

[2] 殷继花,林有希,孟鑫鑫,等. 航空铝合金 7075-T651 高速铣削锯齿形切屑的形成机理研究[J]. 表面技术,2019,48(5):275-285.
YIN Jihua,LIN Youxi,MENG Xinxin,et al. Mechanism of sawtooth chip formation in high speed milling of aviation aluminum alloy 7075-T651[J]. Surface technology,2019,48(5):275-285(in Chinese).

[3] 任建平,宋仁国,陈小明,等. 7xxx 系铝合金热处理工艺的研究现状及进展[J]. 材料热处理技术,2009,38(6):119-124.
REN Jianping, SONG Renguo, CHEN Xiaoming, et al. Research status and progress of heat treatment process of 7xxx series aluminum alloy [J]. Materials heat treatment technology,2009,38(6):119-124(in Chinese).

[4] TISZA M, CZINEGE I. Comparative study of the application of steels and aluminium in lightweight production of automotive parts [J]. International journal of lightweight materials and manufacture,2018,4(1):229-238.

[5] 周万盛,姚君山. 铝及铝合金的焊接[M]. 北京:机械工业出版社,2006.

[6] LOU Y S,HUH H. Prediction of ductile fracture for advanced high strength steel with a new criterion:Experiments and simulation[J]. Journal of materials processing technology,2013,213(8):1284-1302.

[7] LOU Y S,HUH H,LIM S,et al. New ductile fracture criterion for prediction of fracture forming limit diagrams of sheet metals[J]. International journal of solids and structures,2012,49:3605-3615.

[8] LOU Y S,YOON J W,HUH H. Modeling of shear ductile fracture considering a changeable cut-off value for the stress triaxiality[J]. International journal of plasticity,2014,54:56-80.

[9] LOU Y S,CHEN L,CLAUSMEYER T,et al. Modeling of ductile fracture from shear to balanced biaxial tension for sheet metals[J]. International journal of solids and structures,2017,112:169-184.

[10] MOHR D,MARCADET S J. Micromechanically-motivated phenomenological hosford-coulomb model for predicting ductile fracture initiation at low stress triaxiality[J]. International journal of solids and structures,2015,67/68:45-55.

[11] HU Qi,LI Xifeng,HAN Xianhong,et al. A new shear and tension based ductile fracture criterion:modeling and validation[J]. European journal of mechanics-a/solids,2017,66:370-386.

[12] MU Lei,ZANG Yong,WANG Yuan,et al. Phenomenological uncoupled ductile fracture model considering different void deformation modes for sheet metal forming[J]. International journal of mechanical science,2018,141:408-423.

[13] 顾彬,何霁,李淑慧,等. 金属板料各向异性断裂模型及断裂实验研究进展[J]. 塑性工程学报,2019,26(1):1-14.
GU Bin,HE Ji,LI Shuhui,et al. Research progress on anisotropic fracture models and fracture tests for sheet metals[J]. Journal of plasticity engineering,2019,26(1):1-14(in Chinese).

[14] 贾哲,穆磊,臧勇. 金属塑性成形中的韧性断裂微观机理及预测模型的研究进展[J]. 工程科学学报,2018,40(12):1454-1467.
JIA Zhe,MU Lei,ZANG Yong. Research progress on the micromechanism and prediction models of ductile fracture in metal forming[J]. Chinese journal of engineering,2018,40(12):1454-1467(in Chinese).

[15] 李非凡,雷丽萍,方刚. 镁合金塑性变形及延性断裂预测研究进展(下)——延性断裂模型的开发及应用[J]. 塑性工程学报,2020,27(2):1-12.
LI Feifan,LEI Liping,FANG Gang. Research advances of plastic deformation and ductile fracture prediction of magnesium alloys. part Ⅱ:Development and application of ductile fracture models [J]. Journal of plasticity engineering,2020,27(2):1-12(in Chinese).

[16] 詹梅,李锐,郑泽邦,等. 旋压成形损伤断裂缺陷预测研究进展[J]. 精密成形工程,2019,11(5):13-20.
ZHAN Mei,LI Rui,ZHENG Zebang,et al. Research progress on fracture prediction in spin-forming[J]. Journal of netshape forming engineering,2019,11(5):13-20(in Chinese).

[17] HU Qi,ZHANG Feifei,LI Xifeng,et al. Overview on the prediction models for sheet metal forming failure:necking and ductile fracture [J]. Acta mechanica solida Sinica,2018,31(3):259-289.

[18] SAMEK L,DE C B,VAN S J,et al. Physical metallurgy of multiphase steel for improved passenger car crash-worthiness[J]. Steel research international,2004,75(11):716-723.

[19] WASILKOWSKA A, WERNER E, BARTSCH M, et al. Influence of the test conditions on transformation induced plasticity in multiphase steels[C]//Proceedings of 2003 Materials Science & Technology Conference. Chicago :[s. n.],2003.

[20] DE C B, SAMEK L, MAHIEU J, et al. Quasi-adiabatic effects during the high strain rate deformation of dispersed-phase systems with strain-induced martensitic transformation[C]//Proceedings of symposium on the thermodynamics, kinetics, characterization and modelling of austenite formation and decomposition. Ghent: [s. n.],2004.

[21] LEE M S, MOON Y H. Collision resistance of a lightweight center pillar made of AA7075-T6[J]. International journal of automotive technology,2021,22(4):853-862.

[22] SAITO K, IKEDA S, MAKI K. Strain-rate and temperature dependent plastic deformation behavior of low carbon TRIP steel[J]. Transactions of the Japan society of mechanical engineers A,2005, 71(3):465-471.

[23] HASHIMOTO S, IKEDA S, SUGIMOTO K, et al. Effects of Nb and Mo addition to 0.2% C-1.5% Si-1.5% Mn steel on mechanical properties of hot rolled TRIP-aided steel sheets[J]. ISIJ International,2004,44(9):1590-1598.

[24] BAIK S C, PARK S H, KWON O, et al. Effects of nitrogen on the mechanical properties of cold rolled TRIP-aided steel sheets[J]. ISIJ International,2006,46(4):599-605.

[25] LEE C G, KIM S J, OH C S, et al. Effects of heat treatment and Si addition on the mechanical properties of 0.1 wt% C TRIP-aided cold-rolled steels[J]. ISIJ International, 2002, 42(10): 1162-1168.

[26] 倪炀,蔡玉俊,董晓传,等. 7075 合金高温力学性能及本构方程研究[J]. 塑性工程学报,2020,27(2):128-134.
NI Yang, CAI Yujun, DONG Xiaochuan, et al. Study on mechanical properties and constitutive equation of 7075 alloy at high temperature [J]. Journal of plasticity engineering,2020,27(2):128-134 (in Chinese).

[27] 王辉,罗应兵,FRIEDMAN P,等. 高强度铝合金 7075 的温成形性能[J]. 中国有色金属学报(英文版),2012,22(1):1-7.
WANG Hui, LUO Yingbing, FRIEDMAN P, et al. Warm forming properties of high strength aluminum alloy 7075 [J]. Transactions of nonferrous metals society of China,2012,22(1):1-7 (in Chinese).

[28] 周国伟,李大永,彭颖红. T6 态 7075 铝合金温热下各向异性研究[J]. 精密成形工程,2011(6):9-12.
ZHOU Guowei, LI Dayong, PENG Yinghong. Study on anisotropy of T6 7075 aluminum alloy under temperature and heat[J]. Precision forming engineering,2011(6):9-12 (in Chinese).

[29] 任平平,胡会娥. 7050 铝合金板材的各向异性研究[J]. 锻压技术,2021,46(9):163-168.
REN Pingping, HU Hui'e. Study on anisotropy of 7050 aluminum alloy sheet [J]. Forging & stamping technology,201,46(9):163-168 (in Chinese).

[30] 武永甫,李淑慧,侯波,等. 铝合金 7075-T651 动态流变应力特征及本构模型[J]. 中国有色金属学报,2013,23(3):658-665.
WU Yongfu, LI Shuhui, HOU Bo, et al. Dynamic flow stress characteristics and constitutive model of 7075-T651 aluminum alloy[J]. The Chinese journal of nonferrous metals,2013,23(3):658-665 (in Chinese).

[31] 董国疆,陈志伟,杨卓云,等. 采用 M-K 模型和 Lou-Huh 准则对 AA7075-T6 板材成形极限预测的对比研究[J]. 中国有色金属学报(英文版),2020,30(6):1463-1477.
DONG Guojiang, CHEN Zhiwei, YANG Zhuoyun, et al. Comparative study on forming limit prediction of AA7075-T6 sheet metal using M-K model and Lou-Huh criterion [J]. Transactions of nonferrous metals society of China,2020,30 (6):1463-1477 (in Chinese).

[32] 陈志伟,赵长财,董国疆,等. 高强铝板韧性断裂准则参数求解及其成形极限[J]. 中国有色金属学报,2020,30(4):763-774.
CHEN Zhiwei, ZHAO Changcai, DONG Guojiang, et al. Calculation of ductile fracture parameters and forming limit of high-strength aluminum sheet [J]. The Chinese journal of nonferrous metals, 2020,30 (4):763-774 (in Chinese).

(编辑 张璐)